

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.11.001

明确太阳能热发电战略定位促进技术发展

Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress

王志峰^{1,2}, 何雅玲³, 康重庆^{4,5}, 王伟胜⁶, 杜凤丽⁷

WANG Zhifeng^{1,2}, HE Yaling³, KANG Chongqing^{4,5}, WANG Weisheng⁶, DU Fengli⁷

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100864; 2. 中国科学院太阳能热利用和光伏系统重点实验室, 北京 100864; 3. 西安交通大学, 西安 710049; 4. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 5. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京 100085; 6. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 7. 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟, 北京 100190)

(1. Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China; 2. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic Systems, CAS, Beijing 100864, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Energy Internet Research Institute Tsinghua University, Beijing 100085, China; 6. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 7. China Solar Thermal Alliance, Beijing 100190, China)

摘要: 太阳能热发电技术具有安全性高、电力品质高、储能规模大、可双向连接电网的优势,在“碳达峰、碳中和”战略中具有不可替代的地位,在构建以新能源为主体的新型电力系统中将发挥中坚作用。通过近 20 年的发展,我国太阳能热发电产业成熟度高,产业链完整,国内已投运项目的设备国产化率超过 90%,具备大规模应用发展的条件。对太阳能热发电科技引领突破,产业规模发展大幅度降低成本,与光伏风电打捆参与电力市场促进太阳能热发电产业发展等方面进行分析,并提出了建议。

关键词: 太阳能热发电; 碳达峰; 碳中和; 新型电力系统; 电力市场; 战略定位

中图分类号: TK 519 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)11-0001-04

Abstract: Being of high security, excellent power quality, large scale of energy storage and capability of bi-directional grid connection, the Concentrating Solar Power (CSP) technology is irreplaceable on the path to carbon peak and carbon neutrality. It will be the central pillar of the new power system construction taking new energy as the main body. After nearly 20-year growth, China's CSP industry is highly developed with a complete industrial chain. The localization rate of equipment for domestic projects in operation has exceeded 90%, which meets the requirement for large-scale application. By analyzing the breakthroughs of CSP technologies, significant cost reduction due to the scaling up of the industry, promotion of CSP industry made by the bundling of PV power, wind power and solar thermal energy on electric market, relevant proposals are put forward.

Keywords: Concentrating Solar Power (CSP); carbon peaking; carbon neutrality; new power system; electricity market; strategic positioning

0 引言

太阳能热发电是集光热转换发电、大规模储热和电网同步机特性于一身的可再生能源发电方式。太阳能热发电具有长时间储能能力且采用汽轮机-同步发电机技术,可满足现有交流同步电力系统的惯量、故障穿越、电压/频率响应等技术要求,可为绿色低碳电力系统提供可靠的保障与支撑,将在构建

以新能源为主体的新型电力系统中发挥中坚作用。国家主席习近平 2021 年 9 月 21 日出席第七十六届联合国大会一般性辩论并发表题为《坚定信心 共克时艰 共建更加美好的世界》的重要讲话,指出:中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和,这需要付出艰苦努力,但我们会全力以赴。中国将大力支持发展中国家能源绿色低碳发展,不再新建境外煤电项目。太阳能热发电这种唯一具有稳定可控特性的可再生能源发电将进入更加快速的发展期。

从“十五”期间开始,在科技部、国家发改委、财政部、国家能源局以及国家自然科学基金委等部委的支持下,我国在太阳能热发电技术的科研与商业化推广方面取得了长足的进步。截至 2020 年 12 月,我国太阳能热发电已有 3 座实验电站、8 座商业化电站建成并网发电,总装机容量超过 500 MW。中国企业在海外总包建成和在建的电站装机容量达到 1 000 MW。我国太阳能热发电核心技术,具有完全自主知识产权的产业链已基本形成,关键设备部件已全部可国产,产业规模化发展蓄势待发。随着产业链基本形成和逐步稳定,电价也逐步加快下降步伐。2020 年年初,财政部、国家发改委、国家能源局发布《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》(财建[2020]4 号)提出,2021 年 12 月 31 日后新增太阳能热发电项目不再纳入中央财政补贴范围。太阳能光热产业面临新的要求和挑战,需要政府、行业和企业群策群力,共同研究和推进光热技术和产业持续健康发展的措施。

1 太阳能热发电在“双碳”目标中的重要作用

“双碳”战略目标提出,到 2060 年前中国将实现碳中和,可再生能源占一次能源消费比达到 70% 以上。风力发电和光伏发电具有“极热无风”“晚峰无光”等特点和“大装机、小电量”特征^[1],随着“碳达峰”和“碳中和”的推进,高比例、间歇性和波动性的风电与光伏在电力系统中的比重不断增加,在满足电力系统电量需求的同时,也带来较大的调峰压力。2020 年,时任国家电网总工程师陈国平在电力系统发展方向暨学术方向研讨会的主旨报告《现代电力系统的问题、挑战与发展方向》中指出:“电力系统发展需要重构,应大力发展具有传统同步机新特性的光热电源。”2019 年,清华大学能源互联网研究院在《高比例可再生能源电力系统中光热发电的价值发现》一文指出:“灵活可控的特点使得光热发电并网既具有可再生能源效益又具有灵活性效益。发挥运行灵活性特性,可以实现光热与风电、光伏及其他能源打捆的平滑效益,提升区内消纳和打捆外送中的可再生能源消纳水平。高比例可再生能源并网下,太阳能热发电的电力支撑效益显著,有望成为部分地区主要的调节电源重要选项之一。”可以起到“利用可再生能源消纳可再生能源”作用。

1.1 连续发电调节能力强

根据我国 2018 年投产的 3 座商业化太阳能热发电示范项目的运行结果,太阳能热发电机组调峰深度最大可达 80%;爬坡速度快,升降负荷速率可达每分钟 3%~6% 额定功率,冷态启动时间 1 h 左

右、热态启动时间约 25 min,可 100% 参与电力平衡,可部分替代石化类常规发电机组,对保障高比例可再生能源电网的安全稳定运行具有重要价值^[2]。电力规划设计总院以目前新疆电网为例进行过模拟计算,假定建设太阳能热发电机组从 1 000~5 000 MW,可减少弃风弃光电量 10.2%~37.6%。太阳能热发电也具有承担基础负荷的能力,且已被验证。

西班牙有 18 座太阳能热发电站不间断运行达 3 周,其中带 15 h 储能、装机容量 20 MW 的 Gemasolar 电站实现连续 36 d 全天候运行。在我国,装机容量 50 MW 的中广核德令哈太阳能热发电站连续运行 32 d(772.6 h),青海中控德令哈 50 MW 光热电站连续运行 12 d(292.7 h),首航高科敦煌 100 MW 光热电站连续运行 9 d(216.0 h)^[2]。

清华大学能源互联网研究院研究表明,如安装 22 GW 光伏和 7 GW 风电,青海电网在丰水期可连续 3 d 全清洁能源供电(包括省内负荷以及特高压外送河南);如在此基础上配置 4 GW 太阳能热发电,青海省在丰水期可高达创世界纪录的连续 30 d 全清洁能源供电。

1.2 安全性高,适合大容量储能使用

储能安全性是大容量储能的一个重要方面,带有二元硝酸盐的储热是一种安全水平较高的储热方式。目前,国内单机容量最大的首航高科太阳能热发电站储电已达 1 700 MW·h,全球达到了 1 000 GW·h。自 1982 年 4 月美国加州 SOLAR ONE 建成以来,全球 6 690 MW 的装机还未发生过类似锂电爆炸等安全性事故,是一种高安全性的储能方式。

1.3 可双向连接电网

太阳能热发电的熔融盐储能系统,既可通过太阳能集热系统给其充热、储热,也可通过电加热系统将网上的峰值电力转化为热能存储发电。这样的使用方式非常有利于电力系统的电力平衡,也能很好地参与电力市场交易。我国吉林省白城市太阳能热发电与风电和光伏互补项目就鼓励采用这种方式的太阳能热发电。太阳能热发电+可再生能源电力项目正在起步。2021 年 9 月 9 日,吉林省白城市人民政府发布“吉西基地鲁固直流白城 140 万千瓦外送项目入选推荐企业评优结果公示”,风电 800 MW、光伏 400 MW、光热 200 MW^[3]。其中太阳能热发电系统熔融盐储罐中带有可接纳可再生能源电力的电加热系统,太阳能热发电系统对电网形成双向连接,达到灵活调节可再生能源电力的目的。2021 年 9 月 28 日,青海省海南基地青豫直流二

期 3 400 MW 外送项目、海西基地青豫直流二期 1 900 MW 外送项目进行了中标候选人公示。其中,光伏项目规模 3 500 MW、风电项目规模 1 500 MW、光热发电项目规模 300 MW。

2 我国太阳能热发电产业基本成熟,具备加快发展的条件

太阳能热发电技术已在西班牙、美国以及中东、北非等国家和地区取得了良好的应用效果。2020 年全球累计装机容量达到 6 690 MW,分布在西班牙、美国、法国、意大利、以色列、摩洛哥、埃及、阿尔及利亚、南非、智利、阿联酋和中国等。

2.1 我国首批太阳能热发电示范项目拉动了传统电力行业绿色低碳升级

我国 2016 年启动的首批太阳能热发电示范项目对我国攻克首台套关键技术装备和若干“卡脖子”技术提供了关键支撑,为打造我国完整的产业链和系统集成能力奠定了基础,20 个示范项目目前已有 8 个并网运行,所使用的材料和设备国产化率超过了 90%。太阳能热发电产业链主要相关企业已超过 500 家,其中聚光器、吸热器、曲面玻璃反射镜、传储热材料器件和换热器企业总数超过 300 家。我国主要国有能源建设企业几乎都参加了项目建设^[2]。

2.2 地方政府规划太阳能热发电基地情况

随着首批示范项目的开展,我国各级政府部门、金融机构和国家电网对太阳能热发电的投资、财税、土地、并网等政策有了逐步明确的支持思路。截至 2020 年,不少具备太阳能热发电资源条件的地方政府组织编制了太阳能热发电基地规划,主要包括:甘肃玉门、阿克塞、敦煌市,青海海西州乌图美仁光伏光热园区,新疆哈密市,新疆生产建设兵团等总计约 34 GW^[2]。

2.3 太阳能热发电产品产业已经走向世界

虽起步晚,但技术和产业发展快速,我国太阳能热发电技术和装备已走出国门。上海电气集团设计、采购、施工(EPC)总包了阿联酋 700 MW 太阳能热发电站项目。摩洛哥太阳能发电园合计 350 MW 的太阳能热发电项目 EPC 承包方是中国电建集团联合体^[2]。在 2018 年,皇明公司 16 km 长的吸热管出口法国 SUNCNIM 公司,应用于 eLLO 9MW 菲涅尔式 DSG 热发电站。2019 年,中国能建和中控太阳能公司联合体中标希腊 MINOS 项目,投资并承建希腊 50 MW 太阳能发电站。2019 年,常州龙腾太阳能公司出口 6 000 根真空集热管,应用于印度 Meil 50 MW 槽式电站。

3 通过适当市场调节和政策支持,太阳能热发电电价可有效降低

国际能源署(International Energy Agency, IEA)预测 2030 年太阳能热发电电价将降至 8.6 美分/(kW·h)。国际可再生能源署(International Renewable Energy Agency, IRENA)预测,2030 年 G20 国家太阳能热发电电价将降到 8.6 美分/(kW·h)^[1]。美国能源部目标:2030 年带有 12 h 储能的太阳能热发电电价降到 5 美分/(kW·h)。

按照国家太阳能光热产业技术创新战略联盟、中国科学院电工研究所和克林顿基金会预测,若按我国现有太阳能热发电设备和部件的产能计,每年新增一定容量,随着产能扩大,技术发展,工程经验积累和新技术等的推动,预计太阳能热发电电价发展情况为:2 年后可达 0.85 元/(kW·h),5 年后可达 0.60 元/(kW·h),10 年后可达 0.35 元/(kW·h),15 年后可达 0.25 元/(kW·h)^[4]。

如电网采用峰谷分时段电价模式确定发电侧的上网电价,太阳能热发电机组可以利用储热系统,将电量集中到电价高峰时段销售。这样能使太阳能热发电机组的高品质电力在市场中体现合理的价值,甚至在峰值时平价上网。正午前后 2 h 光伏出力最大,约占全天发电量的 70%,此时太阳能热电站进入对储热容器充热的运行模式。到电价晚高峰时段,光伏出力下降甚至为 0,储热驱动热发电电站满负荷运行上网,所需补贴需求可大大降低。

4 发展和建议

电价政策对可再生能源发展至关重要。政府政策支持弥补了行业发展初期技术放大、商业模式不成熟及盈利能力较弱等核心问题,从而加速了科技创新和技术突破的步伐,发电成本得以大幅下降。截至 2020 年年底,我国风电累计补贴拨付约 3 000 亿元,光伏累计拨付约 2 000 亿元(含扶贫)。可以看到,经过累计高达数千亿元的补贴扶持,风电和光伏发电才发展到目前的电价水平。而对于太阳能热发电,截至 2020 年年底全国累计补贴不足 1.5 亿元。

太阳能热发电是清洁、低碳、稳定、安全、高效的灵活电源,对我国“碳中和、碳达峰”战略目标实现,推动能源革命具有重大意义,为此建议如下。

(1)跟踪总结已建成太阳能热发电站的技术经验。我国目前已在不同地域建成了共 550 MW 的不同类型独立太阳能热发电站,2021 年又启动了吉林

白城和青海格尔木共计 500 MW 与光伏风电互补的太阳能热发电站建设,国家有关部委应组织科研和产业化力量,打破企业界限,对这些电站的技术进行跟踪总结,结合实际运行情况挖掘其中的科学技术难题,在此基础上集中力量攻克关键技术,形成完整产业链和系统集成能力,优化产品结构,这对太阳能热发电的技术进步将起到重要作用,也是国家设立示范项目的初衷。

(2)国家应确立对太阳能热发电原创性及核心技术的持续支持政策。在“双碳”战略目标下,对可再生能源高占比具有支撑作用的太阳能热发电的电价降低和规模化发展需要更多 0—1 的原创性技术支撑,建议科技部在“十四五”及今后的科技发展规划中加大对太阳能热发电的支持力度,特别侧重对原创性技术的支持,以期在聚光、光热转换材料和装置、储/放热材料和装备技术、发电工质、电站控制等核心装备,新型发电方式等方面有重大突破。而科技部目前的规划和专项实施方案中对于太阳能热发电技术的支持力度尚且不足。

(3)从可再生能源发展专项资金中安排资金,用于支持太阳能热发电新技术研发和新技术示范工程初投资。2011 年 1 月,财政部、国家发展改革委、国家能源局印发《可再生能源发展基金征收使用管理暂行办法》(财综〔2011〕115 号)。可再生能源发展基金包括国家财政公共预算安排的专项资金(以下简称可再生能源发展专项资金)和依法向电力用户征收的可再生能源电价附加收入等。建议通过可再生能源发展专项资金安排相关资金用于支持太阳能热发电新技术研发,或者用于对新技术示范工程初投资进行补贴。制定科学的电价退坡机制和价格形成机制促进该技术快速提高经济性,包括采用招标方式鼓励技术先进、成本降低较快的技术路线发展。例如,超临界二氧化碳发电技术,超超临界太阳能热发电技术,太阳能与火电联合运行技术,太阳能高温集热和化学能耦合发电技术,太阳能热发电热电联产技术,太阳能与风电及光伏联合运行技术等。

(4)太阳能热发电/光伏/风电等多能互补电站采用综合电价政策。提升区内消纳和外送中的可再生能源消纳水平,在对电源可调度性进行限定的前提下,可对该综合电源采用招标方式确定整体电价并试点综合能源基地储能峰谷电价,这样既带来了电网友好型可再生能源电源,也得到了较低成本的可再生能源电价。在保障调峰和投资收益的条件下,太阳能热发电和光伏的装机功率比例、储热发电量和光伏发电量还需要通过实践进一步研究。

5 结束语

实践证明,太阳能热发电不再单是新能源利用和电力系统调节能力的解决方案和手段,更是大型同步电力系统稳定和大直流超远距离输送的必要支撑基础,为电网尤其是风光富裕且远离负荷中心的弱连接的区域电网提供必要的惯量、故障短路容量、电压频率支撑等。在“双碳”战略目标下,随着新一代电力系统推进,需大力发展太阳能热发电等具备储能特性的电源,太阳能热发电可以逐步替代火电等高碳能源,作为可再生能源的入网调节手段,作为可再生能源高占比电网的重要支撑。

参考文献:

- [1]Global renewables outlook: Energy transformation 2050[R]. 波恩:国际可再生能源署(IRENA),2020.
- [2]中国太阳能热发电及采暖行业蓝皮书 2020[R].北京:国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,2021.
- [3]吉林省白城市人民政府.关于鲁固直流白城 140 万千瓦外送项目优选公告[A/OL].(2021-09-09)[2021-09-20] http://www.jlbc.gov.cn/xxgk_3148/gsgg/202109/t20210909_909998.html.
- [4]中国太阳能热发电产业政策研究报告[R].北京:国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,2013.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

王志峰,研究员,博士生导师,中国科学院太阳能热利用和光伏系统重点实验室主任,博士,从事太阳能热发电系统设计,太阳能高温集热系统中的流动与换热问题,聚光与吸热系统耦合设计,太阳集热器热性能评价理论,太阳跨季节储热等方面的研究(E-mail:zhifeng@vip.sina.com)。

何雅玲,中国科学院院士,西安交通大学教授,博士生导师,博士,从事能源的高效利用及节能理论与新方法,强化换热新技术(含电子器件冷却),太阳能高效综合利用,燃料电池,储能科学与新技术,余热利用新技术,航天航空中的热流科学问题,制冷与空调技术,流动与传热过程的数值预测原理及其应用等方向的研究。

康重庆,教授,博士生导师,清华大学电机工程与应用电子技术系主任,清华大学能源互联网研究院院长,国家杰出青年科学基金获得者,IEEE Fellow, IET Fellow, CIGRE C1.39 工作组召集人,从事电力系统规划、电力系统调度运行、可再生能源、低碳电力技术、负荷预测等方向的研究。

王伟胜,正高级工程师,中国电力科学研究院副总工程师兼新能源研究中心主任,博士生导师,博士,从事新能源发电并网运行技术等方向的研究。

杜凤丽,国家太阳能光热产业技术创新战略联盟常务副理事长兼秘书长,硕士,从事联盟各项工作落实及国内外交流合作等方面的工作。